

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«МИРЭА – Российский технологический университет»**

**РТУ МИРЭА»**

---

**ЛЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**Конфиденциальная информация и ее защита в документационном  
обеспечении управления**

**Электроника**

**Уровень бакалавриат**

**Форма обучения очная**

**Направление**

**подготовки 10.03.01 Информационная безопасность**

**Институт комплексной безопасности и специального приборостроения**

**Кафедра кафедра электроники**

**Лектор д.т.н., профессор Филинов В.В.**

**Используются в данной редакции с учебного года 2020/21**

**Проверено и согласовано «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.**  
*(подпись директора Института Филиала  
с расшифровкой)*

Москва 2020г.

# 1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

## 1.1. Полупроводниковые приборы

### 1.1.1. Общие сведения

Электроника - область науки и техники, изучающая физические явления в полупроводниковых и электровакуумных приборах, электрические характеристики и параметры этих приборов, принципы построения и свойства устройств с их использованием.

В своем развитии электроника прошла несколько этапов. Первое электронное устройства (конец XIX – середина XX века) выполнялись на электровакуумных приборах (электронных лампах). С середины XX века широкое применение нашли полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, тиристоры), изготавливаемые как отдельные, самостоятельные элементы, из которых собирались электронные устройства. В последнюю четверть XX века основой многих электронных устройств стали интегральные микросхемы, представляющие пластинку полупроводника с размещенными на ней множеством транзисторов и других элементов электрических цепей. Со времени их изобретения (США, 1959г.) интегральные микросхемы постоянно совершенствуются и усложняются. В современных сверхбольших интегральных схемах счет уже идет на десятки миллионов транзисторов и других элементов.

В настоящее время для решения тех или иных задач (преобразования вида энергии, усиление сигналов, генерирование мощных излучений, управление электродвигателями, обработки цифровой информации, и ее отображение и т. п.) используются все виды электронных приборов, но явное преимущество сохраняется за полупроводниковыми приборами и микросхемами.

Элементарная база электроники включает в себя **пассивные** (не преобразующие электрическую энергию) и **активные** (преобразующие электрическую энергию) элементы.

К **пассивным** элементам относятся сопротивления ( $R$ ), емкости ( $C$ ) и индуктивности ( $L$ ). Реальные компоненты отражающие свойства  $R$ ,  $C$  и  $L$  - резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности могут существенно отличаться от их идеальных моделей. Эти отличия зависят от технологии, материала и условий эксплуатации.

Резисторы, помимо активного сопротивления, обладают ощутимой на высоких частотах проходной емкостью, включенной параллельно активному сопротивлению и составляющей от сотых долей до единиц пикофарад. Лакопленочные и иные резисторы, в которых используются сплошные слои проводящего материала, почти не имеют собственной индуктивности, и ею можно пренебречь вплоть до частот в сотни мегагерц, но между их проводящим слоем и другими частями схемы образуются паразитные конденсаторы с емкостями до несколько пикофарад. Как правило, эти емкости больше, чем проходные. Другой недостаток резисторов этих типов - сильная зависимость активного сопротивления от времени, температуры и влажности. Обычно сопротивление резисторов не выходят из пределов, оговоренных в

технических условиях, но нельзя применить их в устройствах, рассчитанных на меньшие отклонения.

Проволочные резисторы обладают значительно большей температурой и временной стабильностью, но у них большие паразитные емкости и значительны паразитные индуктивности. В цепях, где точность и стабильность активных элементов имеет решающее значение, проволочные резисторы незаменимы.

Реальные конденсаторы еще больше отличаются от идеала, чем резисторы. Прежде всего, у них есть сопротивление утечки, шунтирующее емкость. Для высококачественных конденсаторов (например, слюдяных, фторопластовых, керамических и т.п.) собственные утечки составляют при малой влажности и нормальной температуре гигаомы ( $1 \text{ ГОм} = 10^9 \text{ Ом}$ ) и в большей мере зависят от состояния поверхности корпуса или монтажной платы, чем от диэлектрика. Конденсаторы с большими емкостями, например электролитические, имеют сопротивление утечки в сотни, иногда - десятки килоом, но зато могут иметь емкости до десятков и сотен тысяч мкФ. Промежуточное положение занимают бумажные и пленочные конденсаторы.

Катушки индуктивности, не имеющие ферромагнитных сердечников, могут быть достаточно близки к идеальной индуктивности, но даже в них сопротивление провода играет роль. В дросселях с сердечниками нелинейность последних приводит к тому, что отличия от идеальной индуктивности оказываются очень существенными. Другая особенность, вносимая сердечниками, - потери энергии на их перемагничивание и на вихревые токи Фуко в них. Эта энергия в конечном счете обращается в тепловую и ведет к нагреву сердечника. Последнее обстоятельство во много определяет КПД и качество трансформаторов.

### 1.1.2. Полупроводниковые материалы

Работа полупроводниковых приборов основана на использовании электрических свойств материалов, называемых полупроводниками.

По электропроводности полупроводники занимают промежуточное положение между **металлами** и **диэлектриками**. Удельное электрическое сопротивление полупроводников при комнатной температуре лежит в пределах  $10^{-3} - 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . В качестве полупроводниковых веществ используется **кремний (Si)**, **германий (Ge)** (элементы IV группы периодической системы Менделеева), а также **селен**, **арсенид галлия**, **фосфид галлия**, и др.

Особенностью полупроводников отличительной от металлов и диэлектриков является их способность в широких пределах менять свою проводимость при изменении внешних энергетических воздействиях (температуры, света, электромагнитного поля, механических деформаций и т.д.).

Электропроводимость чистых однородных полупроводников при температуре, отличной от абсолютного нуля, обусловлена по- парным

образованием (генерацией) свободных носителей заряда - **электронов и дырок**.

При сообщении полупроводнику определенной энергии один из электронов вырывает из узла связи кристаллической решетки и становится свободным, а освободившееся в узле решетки место приобретает положительный заряд, равный заряду электрона. Это вакантное для электронов место кристаллической решетки получило название дырки. Наряду с генерацией носителей заряда при их хаотичном движении происходит процесс **рекомбинации** - воссоединение (исчезновение) пары носителей заряда при встрече свободного электрона с дыркой. Устанавливается динамическое равновесие между количеством возникающих и исчезающих пар, и при неизменной температуре общее количество свободных носителей заряда остается постоянным.

При приложении к проводнику внешнего электрического поля движение свободных зарядов упорядочивается, электроны и дырки движутся во взаимно противоположных направлениях вдоль силовой линии электрического поля. Электропроводность чистого проводника называется **собственной**.

При обычных температурах количество свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике невелико и составляет  $10^{16}$ - $10^{18}$  в  $1\text{ см}^3$  вещества. Такой полупроводник по своим электрическим свойствам приближается к диэлектрикам.

Электрические свойства полупроводников существенно изменяются при введении в них определенных примесей. В качестве примесей используются элементы III и V групп периодической системы Менделеева. Введение, например, в кремний (элемент IV группы) в качестве примеси атомов мышьяка (элемент V группы) создает избыток свободных электронов за счет пятого валентного электрона на внешней оболочке атомов примеси. Удельное электрическое сопротивление такого полупроводника значительно уменьшается, в нем будет преобладать **электронная электропроводность**, а сам полупроводник называется полупроводником **n-типа**. Носители заряда, концентрация которых выше (в данном случае это электроны), называется **основными носителями**, а с меньшей концентрацией (дырки) - **неосновными**.

Введение атомов примеси III группы (например, индия) создает **дырочную электропроводность**, в результате чего образуется полупроводник **p-типа**, здесь дырки - основные носители заряда, а электроны - неосновные. Примеси элементов V группы называют донорными, а примеси элементов III группы - акцепторными.

На практике важное значение имеет область на границе соприкосновения двух полупроводников p- и n-типа. Эта область называется **электронно-дырочным переходом**, или **p-n-переходом**. Такой p-n-переход получают введением в примесный полупроводник дополнительной примеси. Например, при введении донорной примеси в определенную часть полупроводника p-типа в нем образуется область полупроводника n-типа, граничащая с полупроводником p-типа.

На основе использования полупроводниковых материалов с различным типом электропроводности создают полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры и другие приборы. В частности, из полупроводника, равномерно легированного примесями, изготавливают полупроводниковые резисторы. В зависимости от типа примесей и конструкции получаются линейные резисторы, сопротивление которых остается практически постоянным в широком диапазоне напряжений и токов, либо резисторы, сопротивление которых зависит от таких управляющих параметров, как напряжение (варисторы), температура (терморезисторы), освещенность (фоторезисторы), механические деформации (тензорезисторы), магнитное поле (магниторезисторы) и др.

Основными материалами при производстве полупроводниковых приборов являются кремний и германий. Из-за различий по физическим свойствам этих материалов, приборы изготовленные на основе Si, более стойкие к воздействию изменению внешней температуры, но обладают меньшим быстродействием. Приборы на основе Ge, более чувствительны к изменению внешней температуры, но обладают большим быстродействием.

### **1.1.3. P-n-переход и его свойства**

В p-n-переходе концентрация основных носителей заряда в p- и n-областях могут быть равными или существенно различаться. В первом случае p-n-переход называется симметричным, во втором - несимметричным. Чаще используются несимметричные переходы.

Пусть концентрация акцепторной примеси в p-области больше, чем концентрация донорной примеси в n-области (рис. 1.1,а). Соответственно и концентрация дырок (светлые кружки) в p-области будет больше, чем концентрация электронов (черные кружки) в n-области.

За счет диффузии дырок из p-области и электронов из n-области они стремятся равномерно распределиться по всему объему. Если бы электроны и дырки были нейтральными, то диффузия в конечном итоге привела бы к полному выравниванию их концентрации по всему объему кристалла. Однако этого не происходит. Дырки, переходя из p-области в n-область, рекомбинируют с частью электронов, принадлежащих атомам донорной примеси. В результате оставшиеся без электронов положительно заряженные ионы донорной примеси образуют приграничный слой с положительным зарядом. В тоже время уход этих дырок из p-области приводит к тому, что атомы акцепторной примеси, захватившие соседний электрон, образуют нескомпенсированный отрицательный заряд ионов в приграничной области. Аналогично происходит диффузионное перемещение электронов из n-области в p-область, приводящее к тому же эффекту.

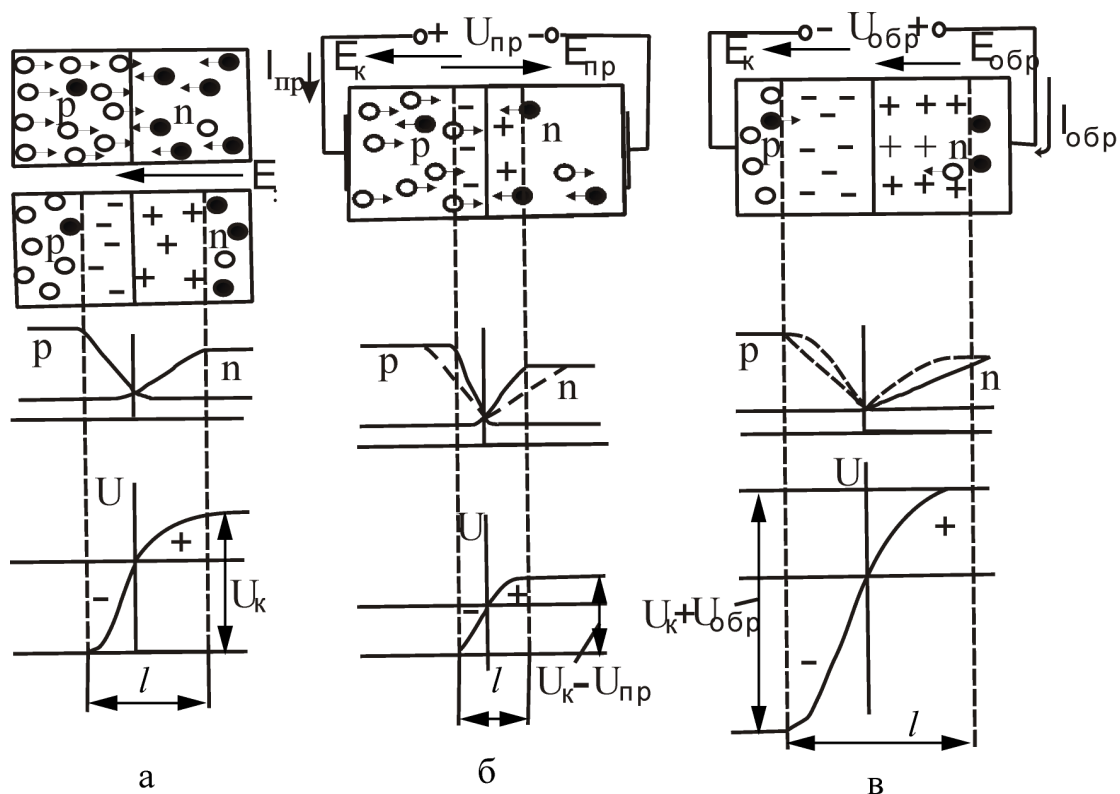


Рис.1.1. Р-п структура: (а) равновесном состоянии; (б) при прямом внешнем напряжении; (в) при обратном внешнем напряжении;  $l$ - ширина р-п – перехода

В результате на границе, разделяющей n-область и p-область, образуется узкий, в доли микрона, приграничный слой  $l$ , одна сторона которого заряжена отрицательно (р-область), а другая - положительно (n-область).

Разность потенциалов, образованную приграничными зарядами, называют **контактной разностью потенциалов**  $U_k$  (рис 1.1,а) или **потенциальным барьером**, преодолеть который носители не в состоянии. Дырки, подошедшие к границе со стороны р-области, отталкиваются назад положительным зарядом, а электроны, подошедшие из n-области, - отрицательным зарядом. Контактной разностью потенциалов  $U_k$  соответствует электрическое поле напряженностью  $E_k$ . Таким образом, образуется р-п-переход шириной  $l$ , представляющий собой слой полупроводника с пониженным содержанием носителей - так называемый обедненный слой, который имеет относительно высокое электрическое сопротивление  $R_k$ .

Свойства р-п-структуры изменяются, если к ней приложить внешнее напряжение  $U_{пр}$ . Если внешнее напряжение противоположно по знаку контактной разности потенциалов и напряженность внешнего поля  $E_{пр}$  противоположна  $E_k$  (рис. 1.1,б), то дырки р-области, отталкиваясь от приложенного положительного потенциала внешнего источника, приближаются к границе между областями, компенсируют заряд части

отрицательных ионов и сужают ширину р-п-перехода со стороны р-области. Аналогично, электроны п-области, отталкиваясь от отрицательного потенциала внешнего источника, компенсируют заряд части положительных ионов и сужают ширину р-п-перехода со стороны п-области. Потенциальный барьер сужается, через него начинают проникать дырки из р-области и электроны из п-области и через р-п-переход начинает течь ток .

С увеличением внешнего напряжения ток возрастает неограниченно, так как создается основными носителями, концентрация которых постоянно восполняется источником внешнего напряжения.

Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, открывающей, а созданный ею ток - прямым. При подаче такого напряжения р-п-переход открыт и его сопротивление  $R_{пр} \ll R_k$  .

Если к р-п-структуре приложить напряжение обратной полярности  $U_{обр}$  (рис. 1.1,в), эффект будет противоположный. Электрическое поле напряженностью  $E_{обр}$  совпадает по направлению с электрическим полем  $E_k$  р-п-перехода. Под действием электрического поля источника дырки р-области смещаются к отрицательному потенциалу внешнего напряжения, а электроны п-области - к положительному потенциалу. Таким образом, основные носители заряда отодвигаются внешним полем от границы, увеличивая ширину р-п-перехода, который оказывается почти свободным от носителей заряда. Электрическое сопротивление р-п-перехода при этом возрастает. Такая полярность внешнего напряжения называется обратной, запирающей. При подаче такого напряжения р-п-переход закрыт и его сопротивление  $R_{обр} \gg R_k$  .

Тем не менее при обратном напряжении наблюдается протекание небольшого тока  $I_{обр}$ . Этот ток в отличие от прямого определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар "свободный электрон - дырка" под воздействием температуры. Эти носители обозначены на рис. 1.1,в единственный электрон в р-области и единственной дыркой в п-области. Значение обратного тока практически не зависит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар "электрон - дырка" при неизменной температуре остается постоянным, и даже при  $U_{обр}$  в доли вольт все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения р-п-переход уподобляется конденсатору, пластинами которого является р- и п-области, разделенные диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей заряда. Эту емкость р-п-перехода называют **барьерной**. Она тем больше, чем меньше ширина р-п-перехода и чем больше его площадь.

Принцип работы р-п-перехода характеризуется его вольт-амперной характеристикой. На рис.1.2 показана полная вольт-амперная характеристика открытого и закрытого р-п-переходов.

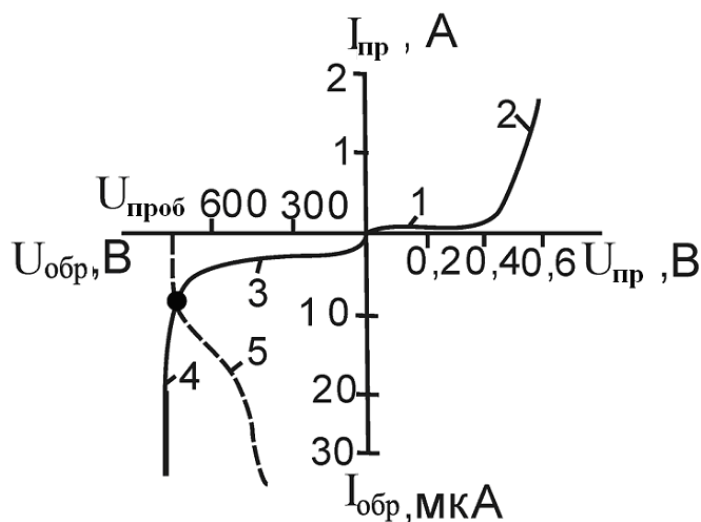


Рис. 1.2. Вольт-амперная характеристика р-п- перехода

Как видно, эта характеристика является существенно нелинейной. На участке 1  $E_{пр} < E_K$  и прямой ток мал. На участке 2  $E_{пр} > E_K$ , запирающий слой отсутствует, ток определяется только сопротивлением полупроводника. На участке 3 запирающий слой препятствует движению основных носителей, небольшой ток определяется движением неосновных носителей заряда. Излом вольт-амперной характеристики в начале координат обусловлен различными масштабами тока и напряжения при прямом и обратном направлениях напряжения, приложенного к р-п-переходу. И наконец, на участке 4 при  $U_{обр} = U_{проб}$  происходит пробой р-п-перехода и обратный ток быстро возрастает. Это связано с тем, что при движении через р-п-переход под действием электрического поля неосновные носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника. В переходе начинается лавинообразное размножение носителей заряда - электронов и дырок, - что приводит к резкому увеличению обратного тока через р-п-переход при почти неизменном обратном напряжении. Этот вид электрического пробоя называется **лавинным**. Обычно он развивается в относительно широких р-п-переходах, которые образуются в слаболегированных полупроводниках.

В сильнолегированных полупроводниках ширина запирающего слоя меньше, что препятствует возникновению лавинного пробоя, так как движущиеся носители не приобретают энергию, достаточной для ударной ионизации. В тоже время может возникать **электрический пробой** р-п-перехода, когда при достижении критического напряжения электрического поля в р-п-переходе за счет энергии поля появляются пары носителей электрон - дырка, и существенно возникает обратный ток перехода.

Для электрического пробоя характерна обратимость, заключающаяся в том, что первоначальные свойства р-п-перехода **полностью восстанавливаются**, если снизить напряжение на р-п-переходе. Благодаря этому электрическому пробую используют в качестве рабочего режима в полупроводниковых диодах.



Если температура р-п-перехода возрастает в результате его нагрева обратным током и недостаточного теплоотвода, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению тока (участок 5 рис. 1.2) и нагреву р-п-перехода, что может вызвать разрушение перехода. Такой процесс называется **тепловым пробоем**. Тепловой пробой разрушает р-п-переход.

#### 1.1.4. Полупроводниковые диоды

**Полупроводниковым диодом** называется прибор, который имеет два вывода (приставка "ди-" означает два) и содержит один р-п-переходов. Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды, как следует из самого названия, предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы переменного напряжения они делятся на высокочастотные, низкочастотные и импульсные. Специальные типы полупроводниковых диодов используют различные свойства р-п-переходов; явление пробоя, барьерную емкость, наличие участка с отрицательным сопротивлением и др.

Конструктивно выпрямительные диоды делятся на плоскостные и точечные, а по технологиям изготовления на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные. Плоскостные диоды благодаря большой площади р-п-перехода используются для выпрямления больших токов. Точечные диоды имеют малую площадь р-п-перехода и, соответственно, предназначены для выпрямления малых токов. Для увеличения напряжения лавинного пробоя используются выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных диодов.

**Выпрямительные диоды** большой мощности называются силовыми. Материалом для таких диодов служит кремний или арсенид галлия. Германий практически не применяется из-за сильной температурной зависимости обратного тока. Кремниевые сплавные диоды используются для выпрямления переменного тока с частотой до 5 кГц. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на повышенной частоте, до 100 кГц. Кремниевые эпитаксиальные диоды с металлической подложкой (с барьером Шотки) могут использоваться на частотах до 500 кГц. Арсенидгаллиевые диоды способны работать в диапазоне частот до нескольких МГц.

При большом токе через р-п-переход значительное напряжение падает в объеме полупроводника, и пренебречь им нельзя.

Условное графическое обозначение полупроводникового диода и полярность напряжения на электродах приведено на рис. 3а, а его структура на рис. 1.3б. Электрод диода, подключенный к области р, называют анодом (А), а электрод, подключенный к области п, - катодом (К). Статистическая вольт-амперная характеристика соответствует вольт-амперной характеристике р-п-перехода (рис. 1.2) и показана на рис. 1.3в.

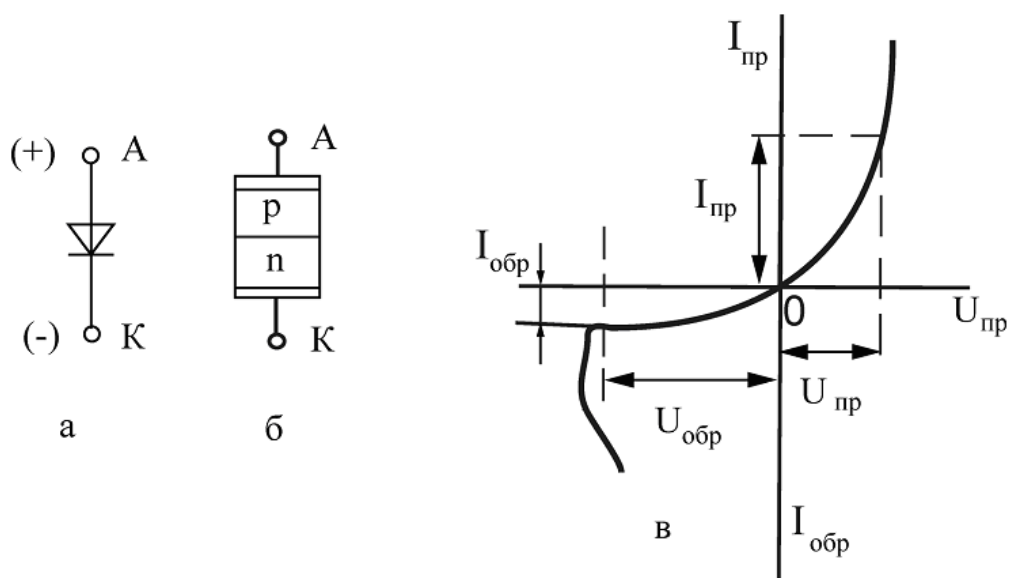


Рис. 1.3 Условное графическое обозначение полупроводникового диода (а), его структура (б), вольт- амперная характеристика (в)

Основными параметрами выпрямительных диодов является прямое напряжение  $U_{пр}$ , которое нормируется при определенном прямом токе  $I_{пр}$ ; максимально допустимой прямой ток диода  $I_{пр. макс}$ ; максимально допустимое обратное напряжение диода  $U_{обр. макс}$ ; обратный ток диода  $I_{обр}$ , который нормируется при определенном обратном напряжении. Сопоставление параметров различных выпрямительных диодов дано в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Значения параметров выпрямительных диодов.

Тип диода	Максимальный допустимый прямой ток $I_{пр. макс}$ , А	Максимальное допустимое обратное напряжение $U_{обр. макс}$ , В	Обратный ток $I_{обр}$ , мкА	Межэлектродная емкость, пФ
Низкочастотный маломощный	0,1 - 1,0	200 - 1000	1 - 200	—
Низкочастотный мощный	1 - 2000	200 - 4000	400 - 5000	—
Высокочастотный	0,01 - 0,5	10 - 100	0,1 - 50	0,3 - 15

Для получения более высокого обратного напряжения полупроводниковые диоды можно включить последовательно. Для последовательного включения подходящими являются диоды с идентичными характеристиками. В настоящее время выпускаются так называемые диодные столбы, в которых соединены последовательно от 5 до 50 диодов. Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр. макс}$  таких столбов лежит в пределах  $2 \div 40$  кВ.

Более сложные соединения диодов имеются в **силовых диодных сборках**. В них для увеличения прямого тока диоды соединяются параллельно,

для увеличения обратного напряжения - последовательно и часто осуществляются соединения, облегчающие применение диодов в конкретных выпрямительных устройствах. Так выпрямительные мосты на кремниевых диодах специально предназначены для использования в однофазных и трехфазных мостовых выпрямителях.

К **специальным полупроводниковым диодам** относят приборы, в которых используются особые свойства р-п-переходов: управляемая полупроводниковая емкость - варикапы; лавинный (электрический) пробой - стабилитроны; фотоэффект - фотодиоды; фотонная рекомбинация носителей зарядов - светодиоды; многослойные диоды - динисторы. Кроме того, к диодам относят некоторые типы приборов с тремя выводами, такие, как тиристоры и двухбазовые диоды.

**Варикапы** - это полупроводниковые диоды, в которых используется барьерная емкость р-п-перехода. Эта емкость зависит от приложенного к диоду обратного напряжения и с увеличением его уменьшается. Схематическое изображение варикапа приведено на рис.1.4а, а его вольт-амперная характеристика - на рис.1.4б. Основным параметром варикапа является; его начальная емкость  $C_o$ , коэффициент перекрытия по емкости  $K_c$ .

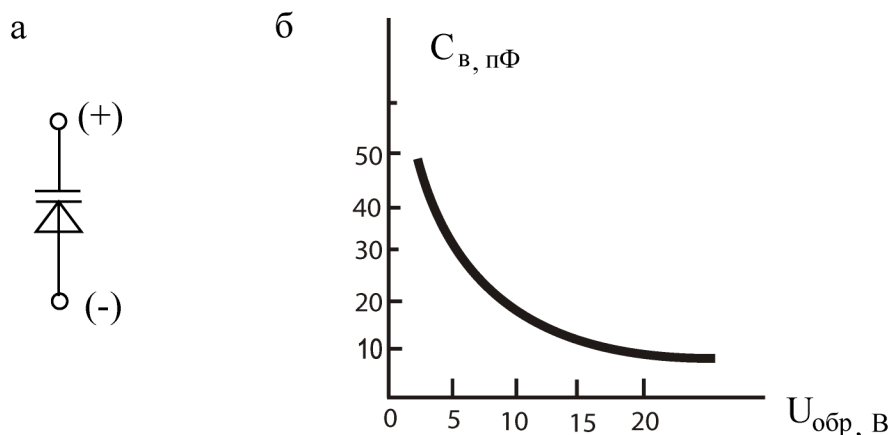


Рис. 1.4. Схематичное изображение варикапа (а) и зависимость емкости варикапа от обратного напряжения (б)

Коэффициент перекрытия по емкости определяется как отношение максимальной емкости  $C_{\text{макс}}$  варикапа к его минимальной емкости  $C_{\text{мин}}$

$$K_c = \frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{мин}}}.$$

Варикапы находят применение в различных электронных схемах: модуляторах, перестраиваемых резонансных контурах, генераторах с электронной настройкой, параметрических усилителях и генераторах и др.

**Стабилитроны** - это полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного (электрического) пробоя. При обратном смещении полупроводникового диода возникает электрический лавинный пробой р-п-перехода. При этом в широком диапазоне изменения тока через диод

напряжение на нем меняется очень незначительно. Для ограничения тока через стабилитрон последовательно включают сопротивление. Если в режиме пробоя мощность, расходуемая в нем, не превышает предельно допустимую, то в таком режиме стабилитрон может работать неограниченно долго.

На рис. 1.5а показано схематическое изображение стабилитрона, а на рис. 1.5б приведены их вольт-амперные характеристики.

Из вольт-амперных характеристик рис. 1.5 видно, что при изменении тока через стабилитрон  $\Delta I_{ст}$  напряжение на стабилитроне  $U_{ст}$  практически постоянно.

Напряжение стабилизации стабилитронов зависит от температуры. На рис. 1.5б штриховой линией показано перемещение вольт-амперных характеристик при увеличении температуры. Очевидно, что повышение температуры увеличивает напряжение лавинного пробоя при  $U_{ст} > 5В$  и уменьшает его при  $U_{ст} < 5В$ . Иначе говоря стабилитроны с напряжением стабилизации больше 5В имеют положительный температурный коэффициент напряжения (ТКН), а при  $U_{ст} < 5В$  – отрицательный. При  $U_{ст} = 6... 5В$  ТКН близок к нулю.

Иногда для стабилизации напряжения используют прямое падение напряжения на диоде. Такие приборы в отличие от стабилитронов называют *стабисторами*. В области прямого смещения *p-n*- перехода напряжение на нем имеет значение 0,7...2 В и мало зависит от тока. В связи с этим стабисторы позволяют стабилизировать только малые напряжения (не более 2В). Для ограничения тока через стабистор последовательно с ним также включают сопротивление.

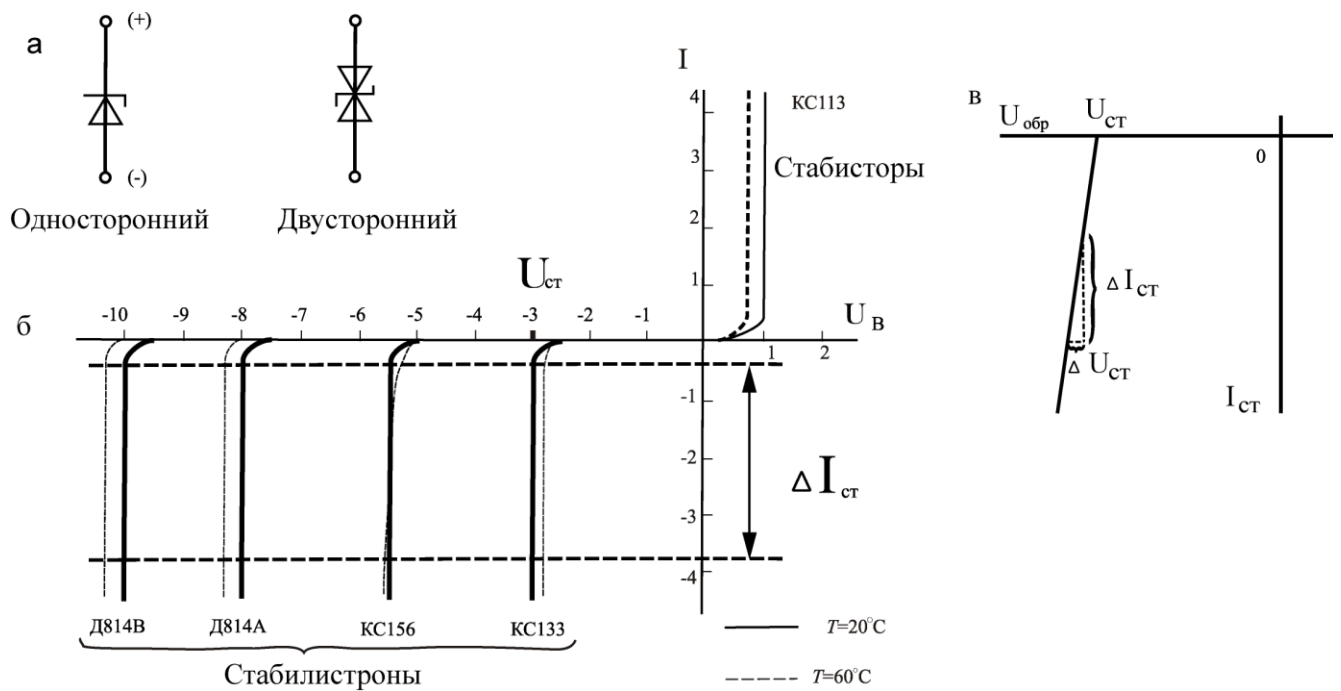


Рис. 1.5. Схематическое изображение стабилизаторов (а) их вольт –амперные характеристики (б), идеальная характеристика (в)

Основными параметрами стабилизаторов являются:

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации  $ТКН_{ст}$ ;
- допустимый ток через стабилизатор  $I_{ст.доп}$ ;
- дифференциальное сопротивление стабилизатора  $R_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$

**Дифференциальное сопротивление стабилизатора** – это параметр, который характеризует наклон вольт-амперной характеристики в области пробоя. На рис. 1.5в, приведена линеаризованная характеристика стабилизатора, с помощью которой можно определить его дифференциальное сопротивление в основе выпрямляющего диода может использоваться не только переход между полупроводниками  $p$ - и  $n$ -типа, но и между полупроводником и металлом. Такие диоды называются **диодами Шоттки**.

Основной отличительной особенностью характеристик диода Шоттки является значительное меньшее прямое падение напряжения по сравнению с диодами на основе  $p$ - $n$ -перехода. Это объясняется тем, что в диоде Шоттки одно из веществ перехода-металл, и следовательно, его электрическое сопротивление (и соответствующее падение напряжения на нем) значительно меньше, чем у полупроводника.

Другая особенность диода Шоттки- отсутствие проникновения неосновных носителей заряда из металла в полупроводник (в рассматриваемом случае – дырок, которые для  $n$ - области являются неосновными). Это значительно повышает быстродействие диодов Шоттки по сравнению с обычными диодами, так как отпадает необходимость в рассасывании таких носителей при смене полярности внешнего напряжения.

Диоды Шоттки, у которых выпрямляющий переход представляет собой тонкую пленку молибдена или алюминия, нанесенную на пластинку кремния методом вакуумного напыления, обладают емкостью, не превышающей

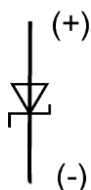


Рис. 1.6. Условное обозначение диода Шоттки

0,01 пФ. Это обеспечивает чрезвычайно малое время их переключения (доли наносекунды) и предельно высокую частоту работы (десятки гигагерц). Мощные диоды позволяют пропускать токи в десятки ампер при обратных напряжениях до 500 В. Благодаря меньшему прямому напряжению они обеспечивают более высокий КПД. Условное обозначение металлополупроводникового диода Шоттки приведено на рис. 1.6 .

**Фотодиод** представляет собой диод с открытым  $p-n$ -переходом. Световой поток  $\Phi$  фотодиода, падающий на открытый  $p-n$ -переход приводит к появлению в одной из областей дополнительных неосновных носителей зарядов, в результате чего увеличивается обратный ток. В общем случае ток фотодиода определяется световым потоком.

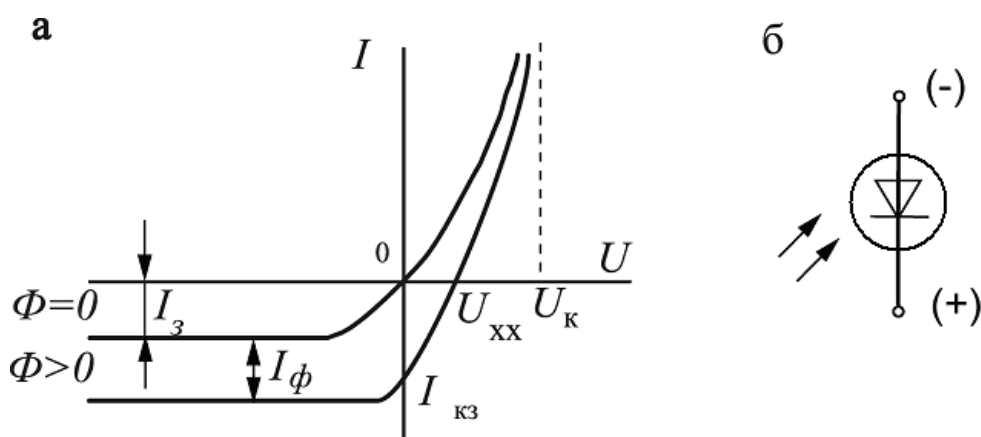


Рис. 1.7. Вольт-амперная характеристика фотодиода (а), его схематическое изображение (б)

Вольт-амперные характеристики фотодиода приведены на рис. 1.7а, а его схематичное изображение – на рис. 1.7б.

Без включения нагрузки фотодиод может работать в двух режимах: 1) короткого замыкания и 2) холостого хода. В режиме короткого замыкания напряжение на диоде равно нулю, и ток в диоде определяется  $\Phi$ . Таким образом, в режиме короткого замыкания соблюдается прямая пропорциональность между током в диоде и световым потоком. При  $\Phi=0$  существует теневого ток  $I_s$ . Такая пропорциональность достаточно хорошо соблюдается в пределах 6-7 порядков.

В режиме холостого хода тока в диоде нет, а напряжение холостого хода  $U_{xx}$  отмеченное на рис.1.7 а, лежит на горизонтальной оси. Таким образом, при

Если  $I=0$  область  $p$  заряжается положительно, а область  $n$  – отрицательно и между электродами фотодиода при освещении появляется разность потенциалов, называемая фото-ЭДС ( $E_{\phi}$ ).  $E_{\phi}$  равна напряжению  $U_{xx}$  и не может превышать контактной – разности потенциалов  $U_k$ . Для кремниевых фотодиодов напряжения  $U_{xx} < 0,7\text{В}$ .

Для режима холостого хода характерна логарифмическая зависимость выходного напряжения от освещенности, причем выходное напряжение не превышает некоторого определенного значения при любой освещенности.

Фотодиоды находят применение как приемники энергии оптического излучения. Так солнечные батареи изготавливаются на основе фотодиодов. Светодиоды (светодиоды) преобразуют электрическую энергию в световое излучение за счет рекомбинации электронов и дырок. В обычных диодах рекомбинация электронов и дырок происходит с выделением тепла, т.е. без светового излучения. Такая рекомбинация вызывается фононной.

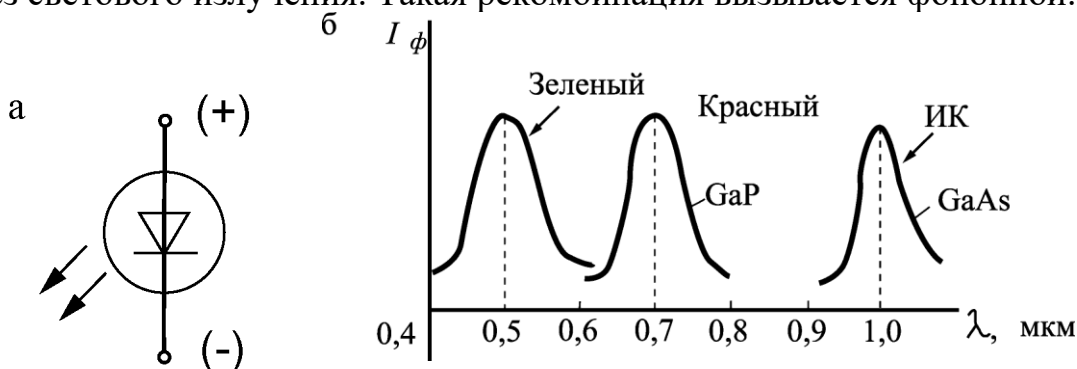


Рис. 1.8 Условное схематическое изображение светодиода (а) и спектральные характеристики излучения (б)

В светодиоде преобладает рекомбинация с излучением света, которая называется фотонной. Обычно такое излучение бывает резонансным и лежит в узкой полосе частот. Для изменения длины волны излучения можно менять полупроводниковый материал, из которого изготовлен светодиод. На рис.1.8 а, показано схематическое изображение светодиода, а на рис. 1.8 б приведены спектральные характеристики излучения.

Для изготовления светодиодов наиболее часто используются фосфид галлия или арсенид галлия. Для диодов видимого излучения часто используют фосфид-арсенида галлия.

Светодиоды изготавливают как в виде отдельных индикаторов, так и в виде семисегментных или точечных матриц. Семисегментные матрицы состоят из семи светящихся полосок- сегментов, из которых можно синтезировать изображение любой цифры от 0 до 9 (такие матрицы используются, например, в электронных часах с цифровой индикацией). В точечных матрицах изображение формируется из светящихся точек. На основе точечных матриц можно синтезировать уже не только изображение цифры, но и любого индицируемого знака (буква, специального символа и т.д.).

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре, которая получила название **оптрон**. При этом они помещаются в один корпус (рис. 1.9) таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода.

Оптоны широко используются в электронной аппаратуре для гальванической развязки входных и выходных цепей. Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными, поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение.

Использование оптронов в электронно-вычислительных устройствах является одним из основных методов повышения помехоустойчивости аппаратуры.

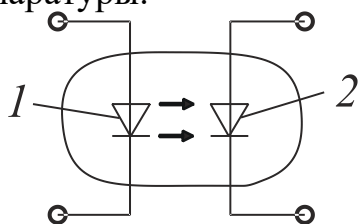


Рис. 1.9. Оптрон:  
1- светодиод; 2-  
фотодиод

Основной носитель помех в радиоэлектронной аппаратуре – корпус. Корпус используется как один из полюсов электропитания, поэтому подключение к нему разных силовых устройств приводит к наведению кратковременных импульсных помех при коммутациях силовых цепей. В то же время для передачи информации чисто электрическим путем между устройствами-источником и приемником

информации – должна быть электрическая связь по корпусу. Если к этому же корпусу подключены силовые цепи, то помехи, вызванные коммутациями в этих цепях, приводят к сбоям в работе других устройств, подключенных к корпусу.

Передача информации с помощью оптронов позволяет развязать электрические цепи питания источника и приемника информации, так как носителем информации является электрически нейтральное оптическое излучение. Таким образом, устройства могут иметь разные корпуса, т.е. оказываются гальванически развязанными и не подверженными воздействию помех.

Кроме защиты от воздействия помех, гальваническая развязка на основе оптронов позволяет решить еще одну задачу – совместную работу устройств, находящихся под разными потенциалами. Любая, даже небольшая, разность потенциалов не позволяет чисто электрически соединять разные устройства, поскольку это приведет к выходу их из строя. Передача сигнала в оптроне возможна, даже если цепи светодиода и фотодиода находятся под разными (в некоторых оптронах до 500 В) напряжениями. Таким образом, устройства, информационно связанные с помощью оптрона, могут находиться под разными электрическими потенциалом.

### 1.1.5. Биполярные транзисторы

**Биполярным транзистором** называется полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой р-п-перехода. Технология



изготовления биполярных транзисторов может быть различной – сплавление, диффузия, эпитаксия, - что в значительной мере определяет характеристики прибора.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторы и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторы. Упрощенное устройство плоскостного  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора приведено на рис. 1.10а, его условное обозначение – на рис. 1.10 б, а схема замещения – на рис. 1.10 в. Аналогичные представления для  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора приведены на рис. 1.10 г, д, е.

Средняя часть рассматриваемых структур называется базой- Б, одна крайняя область - коллектором- К (накопитель электронов), а другая – эмиттером - Э (источник электронов). В несимметричных структурах электрод базы располагается ближе к эмиттеру, а ширина базы зависит от частотного диапазона транзистора и с повышением частоты уменьшается. Полярность напряжений, приложенных к электродам транзистора, показана на рис. 1.10 в, д.

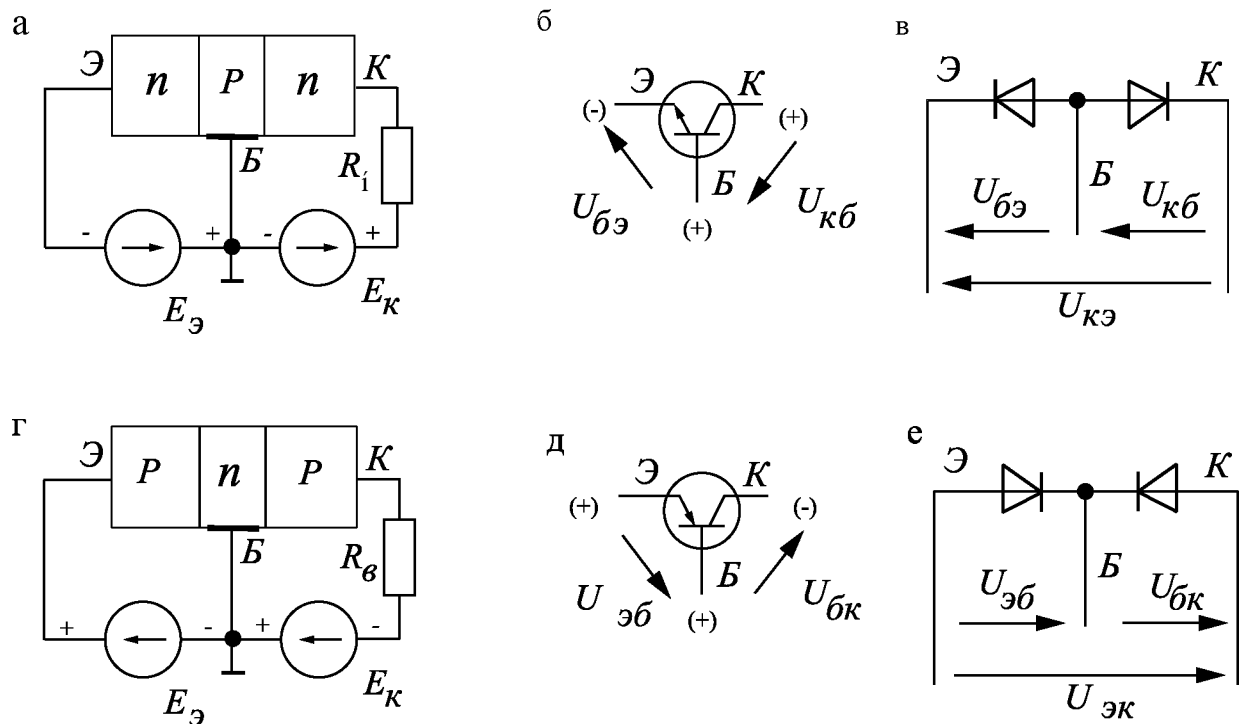


Рис.1.10. Устройство  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора (а), его схематическое изображение-(б) и схема замещения (в). Устройство  $p$ - $n$ - $p$ - транзистора (г), его схематическое изображение (д) и схема замещения (е)

В линейном режиме работы транзистора рис. 1.10 эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, а в режиме отсечки – в обратном.

Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют **эмиттерным переходом**, а между коллектором и базой – **коллекторным**. На рис. 1.11 показаны структура транзистора,  $n$ - $p$ - $n$ -типа. Конструктивной

особенностью биполярных транзисторов является то, что база выполнена слаболегированной, т.е. основных носителей зарядов в ней намного меньше чем в эмиттере и коллекторе.

Рассмотрим работу транзистора типа n-p-n. Между коллектором и базой приложено относительно высокое обратное напряжение  $U_{КБ}$  (рис. 1.11). При отсутствии эмиттерного тока  $I_{Э}$  небольшой обратный ток  $I_{К0}$  через закрытый коллекторный переход обусловлен движением только неосновных носителей заряда (для транзистора типа n-p-n коллектор). Ток  $I_{К0}$  не зависит от тока эмиттера, но существенно зависит от температуры и с ее повышением возрастает. Обратный коллекторный ток обычно составляет  $10 \div 100$  мкА у германиевых и  $0,1 \div 10$  мкА у кремниевых транзисторов.

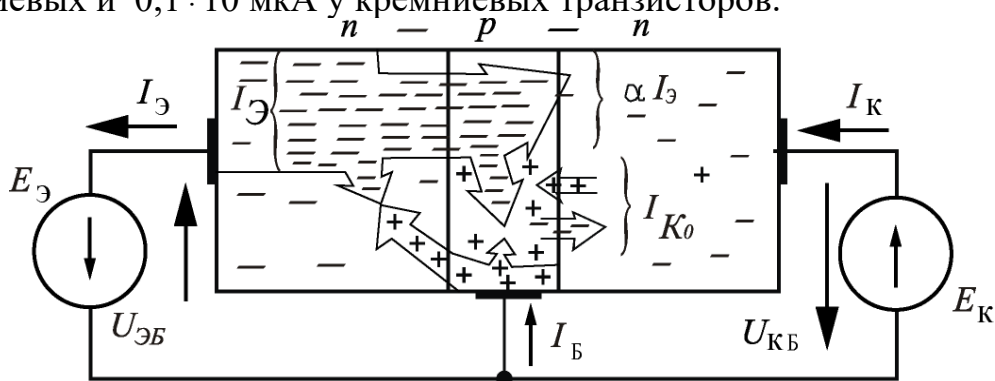


Рис. 1.11. Движение носителей заряда в транзисторе типа n-p-n

При подаче на переход база-эмиттер прямого напряжения  $U_{ЭБ}$  от источника питания возникает эмиттерный ток  $I_{Э}$ , основные носители заряда – электроны преодолевают переход и попадают в базу. База выполнена из обедненного носителями заряда p-полупроводника и для нее электроны являются неосновными носителями заряда. Попавшие в область базы электроны частично рекомбинируют с дырками базы. Но поскольку толщина базы небольшая и концентрация дырок в базе низкая, рекомбинируют лишь немногие электроны, образуя базовый ток  $I_{Б}$ . Большинство же электронов, попав в ускоряющее электрическое поле вблизи коллекторного p-n-перехода, втягиваются в коллектор, свободно проходя через закрытый p-n-переход. Эта составляющая коллекторного тока мало зависит от напряжения на коллекторном p-n-переходе, т.е. при наличии электрического поля все электроны, за исключением рекомбинировавших, попадают в коллектор. Очевидно, что ток коллектора всегда меньше тока эмиттера на значение тока базы и практически равен току эмиттера.

Связь между приращениями эмиттерного и коллекторного токов характеризуется коэффициентом передачи тока

$$\alpha = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_{\mathcal{E}}} \right|_{U_{KB} = const} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} \right|_{U_{KB} = const}$$

Для современных биполярных транзисторов  $\alpha = 0,9 \div 0,995$ . При  $I_{\mathcal{E}} \neq 0$  коллекторный ток транзистора

$$I_K \approx I_{KO} + I_{\mathcal{E}}$$

Таким образом, входным (управляющим) током является эмиттерный ток, а выходным – коллекторный.

Транзисторы р-п-р работают аналогично, только полярности внешних источников меняются на противоположные.

В зависимости от того, какой электрод транзистора используется в качестве общего вывода для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

Рассмотренная на рис. 1.11 схема включения называется схемой с ОБ, на практике она используется редко. Наиболее распространенной является схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером (рис.1.12). Для такой схемы входной контур проходит через переход база-эмиттер и в нем возникает ток базы

$$I_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{E}} - I_K \approx (1 - \alpha)I_K - \alpha I_{KO} \ll I_{\mathcal{E}} \approx I_K$$

Малое значение тока базы во входном контуре и обусловило широкое применение схемы с общим эмиттером.

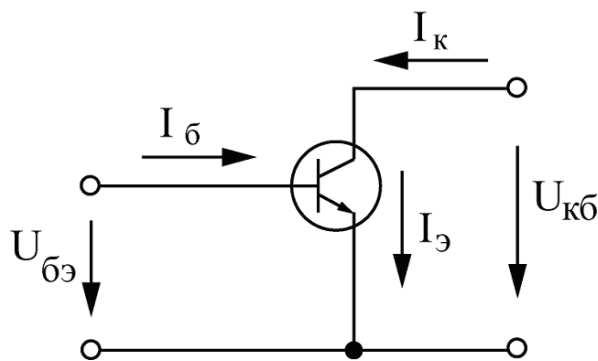


Рис. 1.12. Включение транзистора типа п-р-п по схеме с общим эмиттером

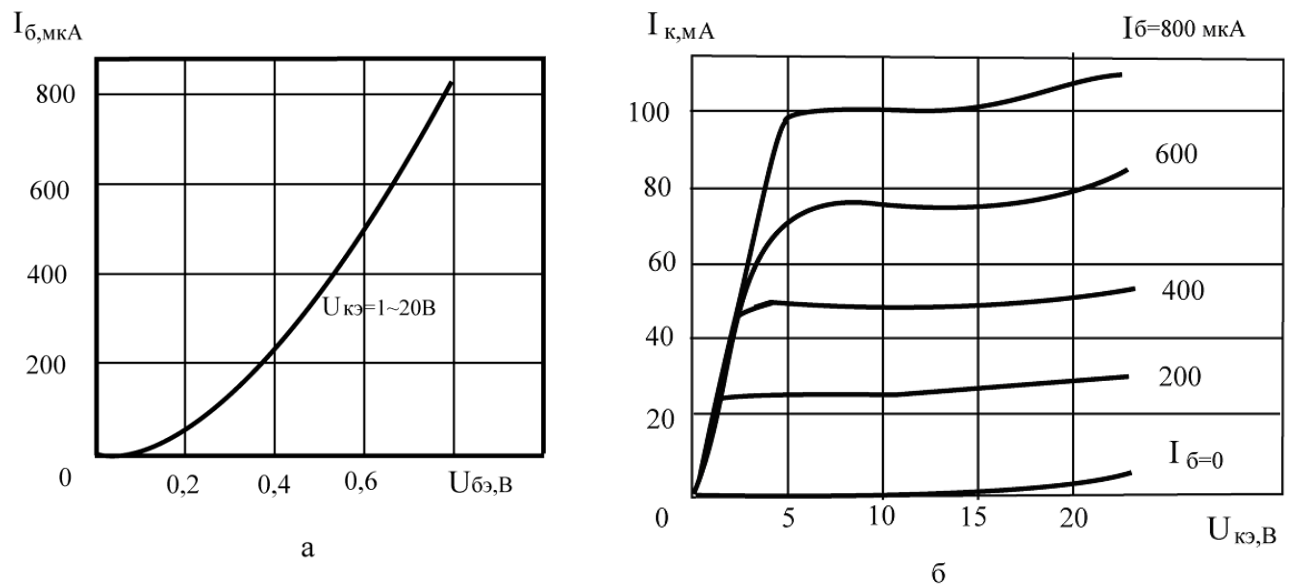


Рис. 1.13. Входная (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

Для анализа работы транзистора и для расчетов схем при больших сигналах часто используют вольт-амперную характеристику (ВАХ) транзистора. На рис. 1.13 показаны типовые ВАХ маломощного биполярного транзистора по схеме включения с ОЭ. Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора  $I_B = f_1(U_{BE})$  называют входной или базовой характеристикой транзистора (рис. 1.13,а). Зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при фиксированных значениях тока базы  $I_C = f_2(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$  называют семейством выходных (коллекторных) ВАХ транзистора (рис. 1.13,б). Входная характеристика практически не зависит от напряжения  $U_{CE}$ , а выходные приблизительно равноудалены друг от друга и почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения  $U_{CE}$ . Для аналитических расчетов устройств с биполярными транзисторами используют  $h$ -параметры транзисторов.

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \text{ при } U_{CE} = \text{const} (\Delta U_{CE} = 0)$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0)$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \text{ при } U_{CE} = \text{const} (\Delta U_{CE} = 0)$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0)$$

Параметры  $h$  могут быть легко определены по входной и выходным характеристикам транзистора с учетом приведенных выше зависимостей.

Параметр  $h_{11}$  имеет размерность сопротивления, он представляет **собой входное сопротивление** биполярного транзистора. Параметр  $h_{12}$  – безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению. Его значения лежат в пределах  $0,002 - 0,0002$  и в большинстве случаев им можно пренебречь, т.е. полагать равным нулю. Параметр  $h_{21}$  – **коэффициент передачи тока**, характеризующий усилительные (по току) свойства транзистора при постоянном напряжении на коллекторе. Параметр  $h_{22}$  имеет размерность проводимости и характеризует **выходную проводимость** транзистора при постоянном токе базы.

Характеристики транзистора сильно зависят от температуры. С повышением температуры резко возрастает начальный коллекторный ток  $I_{K0}$  вследствие значительного увеличения количества неосновных носителей заряда в коллекторе и базе. В то же время несколько увеличивается и коэффициент  $h_{21}$  из-за увеличения подвижности носителей заряда.  $h$ -параметры транзистора, особенно коэффициент передачи тока  $h_{21}$ , зависят от частоты переменного напряжения, при котором производят измерения приращений токов и напряжений  $\Delta I_B$ ,  $\Delta I_K$ ,  $\Delta U_{БЭ}$ ,  $\Delta U_{КЭ}$ , так как на высоких частотах начинает сказываться конечное время, за которое носители заряда (в транзисторе типа  $n-p-n$  это электроны) проходят расстояние от эмиттера до коллектора транзистора.

Частоту, на которой коэффициент передачи тока  $h_{21}$  уменьшается до единицы, называют **граничной частотой** коэффициента передачи тока  $f_{гр}$ . На практике часто используют частоту  $f_0$ , на которой параметр  $h_{21}$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раза.

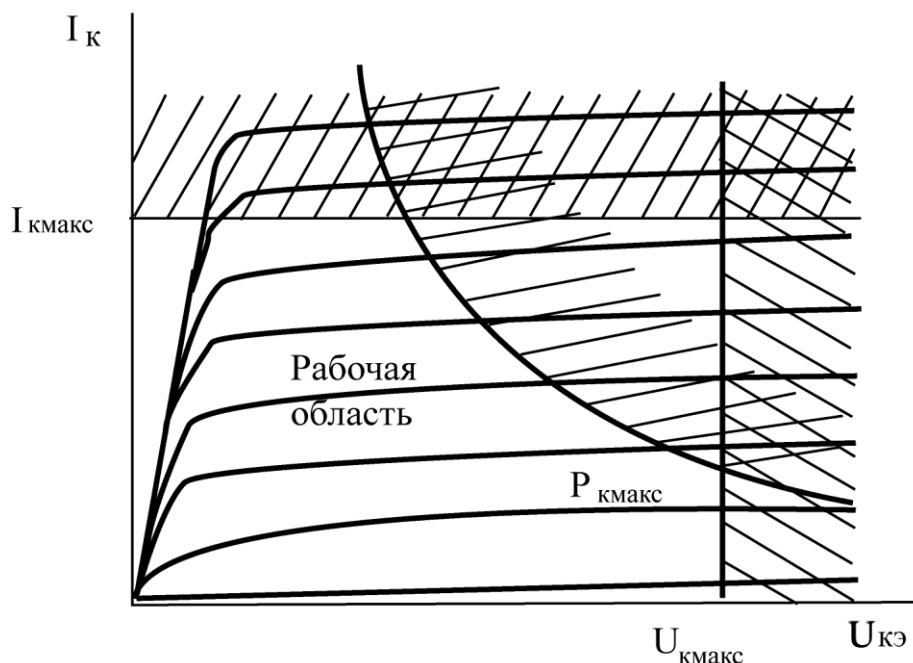


Рис. 1.14. Рабочая область выходных ВАХ биполярного транзистора

Для предотвращения перегрева коллекторного р-п-перехода необходимо, чтобы его мощность не превышала некоторого максимального значения:

$$P_K = I_K U_{KЭ} \leq P_{K \text{ макс.}}$$

Таким образом, ограничивающей кривой на коллекторных характеристиках является зависимость  $I_K = P_{K \text{ макс.}} / U_{KЭ}$ .

В целях увеличения допустимой мощности коллектора  $P_{K \text{ макс}}$  в мощных транзисторах коллектор для улучшения теплоотвода соединяют с металлическим корпусом транзистора, а сам транзистор монтируют на специальном радиаторе.

Ограничение по допустимой мощности коллектора не является единственным. Если между коллектором и эмиттером приложено слишком высокое напряжение, то может произойти электрический пробой коллекторного р-п-перехода, поэтому необходимо, чтобы при работе транзистора коллекторное напряжение было меньше допустимого:

$$U_{KЭ} \leq U_{KЭ \text{ макс.}}$$

Существует аналогичное ограничение и по коллекторному току

$$I_K \leq I_{K \text{ макс.}}$$

которое обусловлено допустимым нагревом эмиттерного перехода.

Область, выделенная этими тремя ограничивающими линиями (рис. 1.14), является **рабочей областью характеристик** транзистора.

Из емкости р-п-переходов существенное значение имеет только емкость коллекторного перехода  $C_{КБ}$ .

Входное сопротивление биполярных транзисторов составляет (10÷100) Ом, выходное (1÷10) кОм.

Диапазоны значений остальных параметров отечественных биполярных транзисторов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Значение параметров биполярных транзисторов.

Тип транзистора	$U_{KЭ \text{ макс.}}$ , В	$P_{K \text{ макс.}}$ , Вт	$I_{K \text{ макс.}}$ , А	$f_{гр}$ , МГц	$S_{КБ}$ , пФ	$h_{21}$
Маломощный	10-80	0,01-0,3	0,01-0,4	1,0-8000	1-10	20-1000
Средней мощности	12-500	0,3-3,0	$\leq 10$	1,0-100	5-100	20-600
Большой мощности	20-1500	3,0-100	$\leq 50$	0,2-10	10-1000	20-200

### 1.1.6. Полевые транзисторы

**Полевым транзистором** называют полупроводниковый электропреобразовательный прибор, ток которого управляется электрическим полем и который предназначен для усиления электрической мощности.

В полевых, или униполярных транзисторах в отличие от биполярных ток определяется движением только основных носителей заряда одного типа – электронов или дырок.

Носители заряда перемещаются по каналу от электрода, называемого **истоком** (И) к электроду, называемому **стоком** (С). С помощью третьего электрода – **затвора** (З) создается поперечное направлению движения носителей заряда управляющее электрическое поле, позволяющее регулировать электрическую проводимость канала, а следовательно, и ток в канале.

Полевые транзисторы изготавливают из кремния и в зависимости от электропроводности исходного материала подразделяют на транзисторы с р-каналом и n-каналом.

По типу управления током канала полевые транзисторы подразделяются на два вида: **с управляющим р-n-переходом** и **с изолированным затвором**. На рис. 1.15 приведены графические обозначения этих полевых транзисторов.

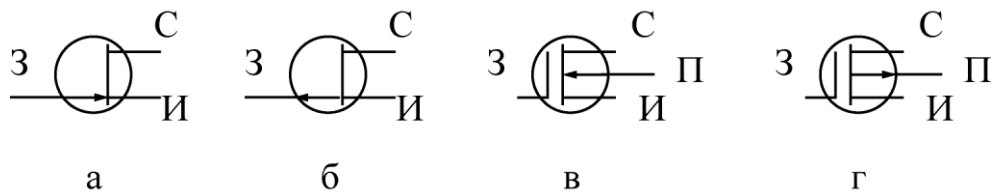
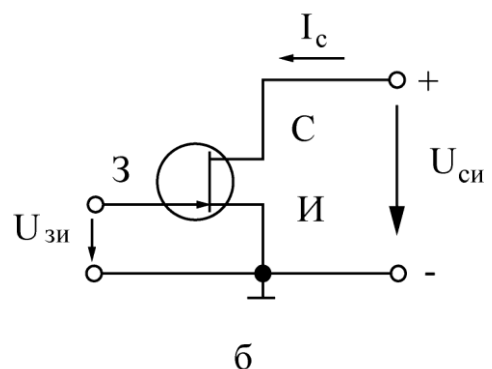


Рис. 1.15. Обозначения полевых транзисторов n и p типов проводимости: а, б – с управляющим р-n-переходом; в, г – с изолированным затвором, где С – сток, З – затвор, И – исток, П – подложка.

Структура и схема включения полевого транзистора с n-каналом и управляющим р-n-переходом показаны на рис. 1.16.



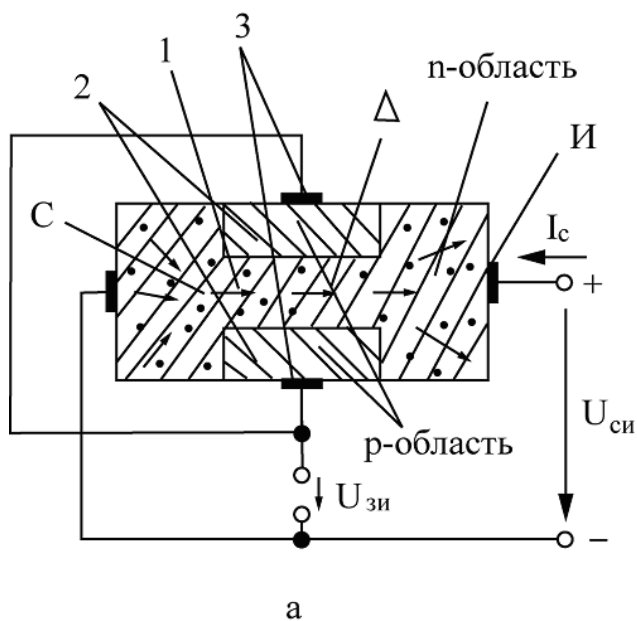


Рис. 1.16. Структура (а) и схема включения (б) полевого транзистора с затвором в виде р-п-перехода и каналом п-типа: 1,2 – области канала  $\Delta$  и р-п-переходов.

В транзисторе с n-каналом основными носителями заряда в канале являются электроны, которые движутся вдоль канала 1 шириной  $\Delta$  от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток стока  $I_c$ . Между затвором и истоком приложено обратное напряжение, запирающее р-п-переход 2, образованный n-областью канала и р-областью затвора. Таким затвором, в полевом транзисторе с n-каналом полярности приложенных напряжений следующие:  $U_{си} > 0$ ,  $U_{зи} \leq 0$ . В транзисторе с р-каналом основными носителями заряда являются дырки, которые движутся в направлении снижения потенциала, поэтому полярности приложенных напряжений должны быть иными:  $U_{си} < 0$ ,  $U_{зи} \geq 0$ .

При изменении электрического потенциала на затворе меняется ширина р-п переходов 2, что приводит к изменению ширины  $\Delta$  канала 1. Последнее меняет количество электронов (дырок), движущихся через сечение канала, и соответственно – ток стока  $I_c$ .

ВАХ полевого транзистора приведены на рис. 1.17. Здесь зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения  $U_{си}$  при постоянном напряжении на затворе  $U_{зи}$  определяют выходные, или стоковые, характеристики полевого транзистора (см. рис. 1.17,а). На начальном участке характеристик,  $U_{си} + |U_{зи}| < U_{зап}$  ток  $I_c$  возрастает с увеличением  $U_{си}$ . При повышении напряжения сток-исток до  $U_{си} = U_{зап} - |U_{зи}|$  происходит перекрытие канала и дальнейший рост тока  $I_c$  прекращается (участок насыщения). Отрицательное напряжение  $U_{зи}$  между затвором и истоком приводит к меньшим значениям напряжения  $U_{си}$  и тока  $I_c$ , при которых происходит перекрытие канала. Область насыщения справа от пунктирной линии является рабочей областью выходных характеристик полевого транзистора.

Дальнейшее увеличение напряжения  $U_{си}$  приводит к пробую



р-п-перехода между затвором и каналом и выводит транзистор из строя. По выходным характеристикам может быть построена передаточная характеристика  $I_C=f(U_{ЗИ})$  (рис.1.17,б). На участке насыщения она практически не зависит от напряжения  $U_{СИ}$ . Входная характеристика полевого транзистора – зависимость тока утечки затвора  $I_3$  от напряжения затвор – исток – обычно не используется, так как при  $U_{ЗИ} \leq 0$  р-п-переход между затвором и каналом закрыт и ток затвора очень мал ( $I_3=10^{-8} \div 10^{-9}$  А), поэтому во многих случаях им можно пренебречь.

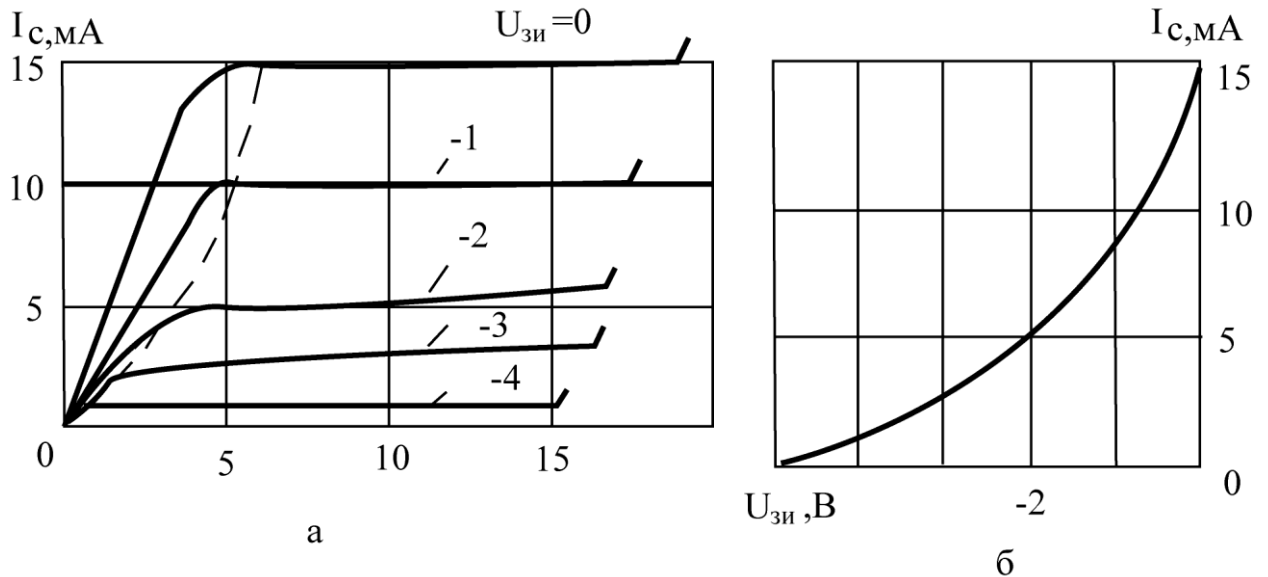


Рис. 1.17. Выходные (а) и передаточная (б) вольт-амперные характеристики полевого транзистора

В настоящее время широкое распространение получили полевые транзисторы, в которых металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика. Такие транзисторы называют **МДП-транзисторами** (металл – диэлектрик – полупроводник) или **МОП-транзисторами** (металл – оксид – полупроводник). В последнем случае под оксидом понимают оксид кремния, который является высококачественным диэлектриком. Их входное сопротивление достигает  $10^{15}$  Ом, т.е. ток затвора на несколько порядков ниже тока полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

ВАХ полевых транзисторов с изолированным затвором в основном аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

Основными параметрами полевых транзисторов являются крутизна характеристики передачи

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \text{ при } U_{СИ} = \text{const}$$

и дифференциальное (внутреннее) сопротивление стока (канала) на участке насыщения

$$R_i = \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \text{ при } U_{ЗИ} = \text{const}$$

В качестве предельно допустимых параметров нормируются: максимально допустимые напряжения  $U_{СИ\max}$  и  $U_{ЗИ\max}$ ; максимально допустимая мощность стока  $P_{С\max}$ ; максимально допустимый ток стока  $I_{С\max}$ . Значения параметров полевых транзисторов приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Значения параметров полевых транзисторов

Тип транзистора	$S, \text{мА/В}$	$R_i, \text{МОм}$	$U_{СИ\max}, \text{В}$	$P_{С\max}, \text{Вт}$	$I_{С\max}, \text{мА}$	$I_z, \text{А}$
С управляющим р-п-переходом	1-20	0,1-0,5	5-100	0,1-10	10-1000	$10^{-8}$ - $10^{-9}$
С изолированным затвором	0,5-50	0,1-0,5	5-1000	0,01-50	0,1-5000	$10^{-10}$ - $10^{-15}$

Межэлектродные емкости полевых транзисторов между затвором и стоком  $C_{зс}$ , а также затвором и истоком  $C_{зи}$ , обычно не превышают  $1 \div 20 \text{ пФ}$ .

Основными преимуществами полевых транзисторов являются:

- 1) высокое входное сопротивление;
- 2) малый уровень собственных шумов в измерительных схемах;
- 3) высокая плотность распространения элементов при изготовлении интегральных схем

К недостаткам полевых транзисторов следует отнести сравнительно большие межэлектродные емкости.

### 1.1.7. Тиристоры.

**Тиристоры** – это полупроводниковые приборы с тремя или более р-п-переходами, которые имеют два устойчивых состояния и применяются как мощные электродные ключи.

Тиристоры имеют два вывода от крайних чередующихся р- и п- областей и управляющий электрод (рис. 1.18,а).

Вывод, соединенный с крайней р-областью, называется анодом (А), а с крайней п-областью катодом (К). Внешнее напряжение  $U$  является прямым по отношению к р-п-переходам  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  и обратным для перехода  $\Pi_2$ , поэтому переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  открыты (подобно открытым диодам), а переход  $\Pi_2$  заперт. В результате напряжение  $U$  почти целиком приложено к  $\Pi_2$  и через тиристор протекает небольшой ток, являющийся обратным током  $I_0$  р-п-перехода.

С увеличением напряжения  $U$  ток через тиристор несколько возрастает (Участок ОВ характеристики 1.18 в), а при достижении напряжением значения  $U_{\text{вкл}}$  р-п-переход  $\Pi_2$  пробивается (электрический пробой) и ток лавинообразно увеличивается (участок ВСД рис. 1.18 в) и ограничивается только сопротивлением нагрузки. Изменяя величину тока управляющего электрода  $I_y$  меняю величину напряжения включения  $U_{\text{вкл}}$  тиристора.

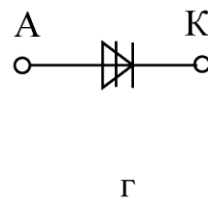
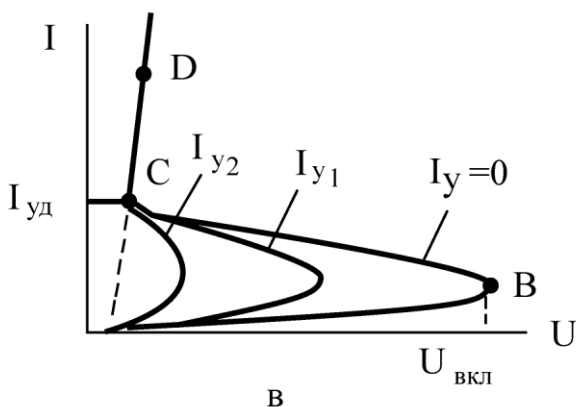
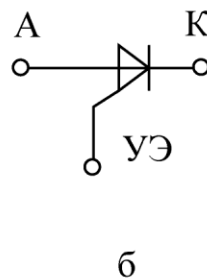
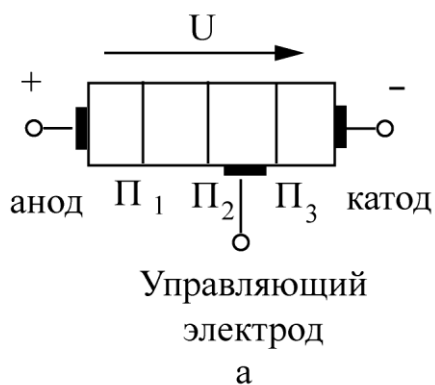


Рис.1.18 Тиристор:  
(а) структура; (б) условное обозначение; (в) вольт-амперные характеристики; (г) условное обозначение динистора

Тиристоры нашли свое применение в силовой электронике и электротехнике – там, где требуется формирование мощных питающих напряжений постоянного или переменного тока, питающих напряжений с регулируемой частотой, специальной формы. В частности, на основе тиристоров разрабатываются устройства регулирования частотой вращения электродвигателей, в том числе в приводах станков.